

気候変動による病害虫被害への影響と水稻の収量/ 品質への影響に関する 実証研究

著者	野村 魁, 日引 聡
雑誌名	DSSR Discussion Papers
号	J-9
ページ	1-28
発行年	2020-06
URL	http://hdl.handle.net/10097/00128027

DSSR

Discussion Paper No.J-9

気候変動による病虫害被害への影響と水稻の収量/品質への
影響に関する実証研究

野村 魁 日引 聡

2020 年 6 月

Data Science and Service Research
Discussion Paper

Center for Data Science and Service Research
Graduate School of Economic and Management
Tohoku University
27-1 Kawauchi, Aobaku
Sendai 980-8576, JAPAN

気候変動による病虫害被害への影響と水稻の収量/品質への 影響に関する実証研究

野村 魁* 日引 聡†

概要

農業は気候変動による影響を受ける。先行研究では、気温が農業生産に与える影響を明らかにするとともに、悪影響緩和のための適応策を評価する研究が行われている。しかし、先行研究では、気温が病虫害被害を通じて農作物に及ぼす影響を明示的に明らかにしていない。本研究は、米を対象に、気温が収量や品質に与える影響を、病虫害を通じた経路とそれ以外の経路に分け、前者の経路の相対的な大きさを明らかにすることで、適応策としての有効性を明らかにすることを目的としている。分析の結果、高気温帯の日数増加が直接的に収量や品質を低下させるだけでなく、病虫害の発生を促進させることで間接的に収量や品質を低下させる影響も明らかにされた。

キーワード：気候変動、パネルデータ、農業、病虫害

* 東北大学大学院経済学研究科 博士課程後期 (E-mail:kai.nomura.p8@tohoku.ac.jp)
† 東北大学大学院経済学研究科 (E-mail:hibiki@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

気候変動は世界各国に共通した重要課題である。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書 (2014) によれば 1950 年代以降、観測された気候変化の多くは前例のないものであり、すでに気候変動は自然環境及び経済社会に影響を与えるとともに、今後温暖化が進むにつれて、深刻で広範囲にわたる不可逆的な影響が生じる可能性が高まることが指摘されている。また、日本の気候変動の影響についても近年の気温上昇や大雨頻度の増加、農作物の品質低下、動植物の生息分布変化、熱中症リスクの増加など様々なリスクが存在することが 2018 年に閣議決定された「気候変動適応計画」内で指摘されているなど、気候変動による影響は多岐にわたり、自然環境や生態系だけでなく、産業・経済活動にまで及ぼされる。

農業は特に影響を受ける産業の一つであり、IPCC (2014) は既に気候変動と関連した穀物収量の減収は起きていて、今後の更なる温暖化にともない、より深刻な問題になることを指摘している。また、日本の気候変動の影響についても近年発生している高温・豪雨などの災害によって農林水産業・農村漁村の生産や生活基盤への影響は大きなものであるとされる。

気候変動の進行自体を遅らせるため、緩和策としての温室効果ガスの削減に取り組むことが最も重要な対策である。しかし、将来的な気候変動が少なからず避けられない場合に、その影響を和らげ、利用する方向に調整する適応策も並行して考えていかなければならない。したがって、作付時期の変更や品種改良など適応策の検討は重要な政策課題の一つである。

Mendelshon ら (1994) や Schlenker and Roberts(2009)、Deschenes and Greenstone(2007)、Fisher ら(2012)、Feng ら(2010)、岡本(1994)、Kim ら(2000)など先行研究は、気象条件が作物収量、あるいは、品質の一方に与える影響について分析してきた。しかし、収量と品質の両方への気象条件の影響を分析した研究は少なく、Okada ら(2011)や Kawasaki and Uchida(2016)が挙げられる程度である。Okada ら(2011)は気温上昇が収量と品質に与える影響を分析したものの、それぞれの影響の大きさの比較検討を行っていない。この点に着目して、Kawasaki and Uchida(2016)は、品質の指標として米の等級データを利用し、気温上昇による収量の増加と品質の低下を通じた農家収入への影響を比較した。その結果、収量増加以上の品質の低下があるが、農家の田植期をずらすことで対応可能であるとしている。

気温上昇が農作物の生産性や品質に与える影響には、気温による直接の影響に加え、害虫の発生を通じた間接的な影響もある。先行研究においては、これらの間接的な影響を十分に考慮していないため、気温が生産性や品質に与える影響は、両方の影響を反映したものになっている。しかし、間接的な影響の中には、対策を実施することによって、その影響を緩和できる可能性のあるものがある。たとえば、気温上昇によって害虫の発生率が上昇したとしても、害虫対策を実施することで、害虫の発生を抑制することができれば、気温上昇による

農作物への影響を緩和することができる。このため、適応策による気温上昇の影響の緩和の効果を明らかにするために、間接的な影響を明示的に扱うことの意義は大きい。

本稿の目的は、間接的な影響として考えられる様々な要因のうち、害虫に焦点を当て、気温上昇による農業への影響を、害虫を通じた影響とそれ以外の気温上昇による影響に区別して識別し、害虫対策による適応策がどの程度有効であるかを明らかにすることにある。

分析の結果として、生育段階の第一段階の高温日数の増加が収量・品質の両方を低下させること、第二段階の低気温日数の増加が収量を低下させること、第二段階の高気温日数の増加が品質を低下させること、第三段階の低気温日数の増加が収量を低下させること、高気温日数の増加が収量・品質の両方を低下させること、病虫害のなかでもカメムシは品質のみを低下させること、ウンカやいもち病は収量のみを低下させることが明らかとなった。また、気温上昇は直接、水稻の生育に影響するだけではなく、病虫害の発生にも影響するということがわかった。これらの結果から、気候変動は直接的に農業生産に負の影響を与えることが明らかとなっただけでなく、生態系に影響を与えることを通じて害虫の発生を促進させるという間接的な負の影響を引き起こす可能性が示唆された。

以下、本稿の構成は次の通りである。まず第2節では、先行研究と背景として、日本における気候変動が農業へ与える影響に関する研究をまとめる。その後、日本の米の品質を決定する等級制度について解説し、その品質を低下させる要因である病虫害の研究蓄積を整理する。第3節では分析に用いる推定方法を、第4節では用いるデータを紹介する。第5節では、推定結果をみて、収量や等級に対して気温や病虫害被害がどのように影響を与えているかを議論する。最後の第6節では、本分析の要約と結論を述べる。

2. 先行研究と背景

2.1 気候変動と農業生産

気候変動の将来的な経済的影響の評価はこれまでも多くの研究がなされている。これらの研究成果は将来的な気候変動に対する緩和策や適応策を策定するために不可欠なものである。試験場実験やクロスセクション分析がある。Adams(1989)やAdamsら(1995)は試験場の実験結果から生産関数を推定することで気候変動の影響を推定したが、これらの結果は作物転換や畜産業への移行など、実際に行われる農家の適応行動を反映していないと批判された。したがって、Mendelsohnら(1994)はクロスセクションデータを用いたリカーディアン分析を提案した。この手法は農地価格や農家所得を従属変数として用いた分析であり、農家が気候変動に対して最適な反応を示すという仮定を置いているため、農地価格や農家所得は適応策を行った上での気候変動の影響を推定していることになる。しかしながら、Deschenes and Greenstone(2007)はリカーディアン分析には欠落変数バイアスの問題があると指摘し、パネルデータによる気候変動の影響を分析した。パネルデータ分析による気候変動の研究は近年数多くあり、Schlenker and Lobell(2010)、Guiteras(2009)、Fengら(2010)、Welchら(2010)などが挙げられる。これらの分析結果では、気候変動は農業生産

に対して負の影響があるということが示されている。これらの結果を受けて、さらに気候変動要因に関して非線形な影響を考慮した Schlenker and Robert(2009)や短期的影響と長期的影響の違いを考慮した Hornberk(2012)や Burke and Emerick(2016)がある。

クロスセクション分析は、気候風土といった時間不変な地理的要因などが制御できないために、気象変数がそれと相関することで、欠落変数バイアスによってパラメータにバイアスが生じるという問題点がある。一方、パネルデータ分析では、時間不変な効果を個別効果として除去できるため、そのバイアスの問題を解決でき、短期の気温の変動に対する農業生産への影響を分析できるものの、長期的な適応行動の効果を分析できないというデメリットがある。クロスセクションでは横断的な気象要因の違いをみているため、それぞれの地域ごとに現在の気候に適した農業生産活動を行うという点で、農家は適応策を行ったうえでの利潤最大化行動を取っていると考えることができ、この分析手法では気候変動の長期的影響を推定している。他方で、パネルデータ分析では地域間の気候の違いは固定効果として除去されるため、各地点の平均値からの偏差を用いた影響を推定している。したがって、この分析手法による結果は一時的な気象要因のショックの影響をみていることになり、短期的な影響のみを示している。短期的な気象要因のショックに対して農家が設備投資や作物転換などの適応策を取るとは考えにくいいため、適応策や適応策が実現可能な場合には、この結果は気候変動の影響を過大評価する可能性がある。以上のことから、2つの分析手法は適応策を含む長期的影響を推定するか、欠落変数バイアスを除去した短期的影響を推定するかのトレードオフとなる。これらの問題に対処するため、Dell ら(2012)や Burke and Emerick(2016)、Moore and Lobell(2015)などは長期差分法を用いた。これは変数の30年間の平均値を取るなどして分析を行うことで、気候風土といった固定効果を除去するとともに、本来のパネルデータが用いる年間の気象要因の変動より長期的変動の影響を捉えることになる。

短期的影響と長期的影響を比較することで、結果に違いがみられないことから Burke and Emerick(2016)や Dell ら(2012)は適応策がほとんど行われていない可能性があると主張したが、気候変動における適応策の低減効果を明示的に議論している研究は非常に少ない。例えば、Feng ら(2010)は気候変動によって人々はより生産に適した土地に移動するということを明らかにしたが、気候変動による生態系の変化、病虫害の発生が経済的影響を及ぼすということについて議論している論文はみられない。気候変動の農業生産に及ぼす影響の深刻度が高い、農業への依存度が高い国では灌漑設備や労働力移動に関する議論が行われるが、灌漑設備は一定程度整備されており、農家の労働力移動よりも後継者問題が深刻な日本では害虫防除の有効性が重要な問題であると考えられる。

2.2 日本における気候変動と農業生産

日本の気候変動に関する問題に限定して考えると、気候変動によって影響を受けると考えられる農作物の収量と品質は農家の収入にとって重要な要因である。特に日本をはじめ、

食の選択肢が多い国においては品質の低下に対して消費者は敏感に反応すると考えられる。日本では水稻や小麦、大豆に関して等級制度が存在している。米の等級検査では、決められた大きさのコンテナに詰め込まれ、各コンテナから採取されたサンプルを、検査官が色や形、水分、登熟度、被害粒、遺物混入率などを基準に判断する。2017 年産の水稻うるち米玄米の検査結果では、1 等米が 82.3%、2 等米が 14.2%、3 等米が 1.6%、規格外が 1.9%となっていて、多くの米が高品質な水準にあるとされている。

米は日本国内において代表的な主食とされている。地球温暖化は米の見た目や香りなど、品質に大きく影響するとされている(岡本:1994, Kim:2000, Okada:2011)。米の収量や品質への気象要因の影響については、作物学を中心に積極的に研究されていて、米の生育期および登熟期に影響が顕著に現れることが明らかにされている。Shimono ら(2002)によれば、生育期の低温が米の生育阻害や収量低下を起こすとされている。また、登熟期の気温について、24℃を閾値として米粒の重量が変化するという研究結果もある(若松ら:2007)。農学分野の研究では、温暖化による気温上昇が日本の米生産収量に与える影響について、楽観的な評価を与えている。すなわち、Iizumi, Yokozawa, Nishimori(2011)は 21 世紀末には 3℃平均気温が上昇するシナリオのシミュレーションのなかで、北海道や東北地域において 30%収量増加、他の地域でも増加するという結論を示している。同様に横沢ら(2009)は国の平均収量が増加すると予測すると同時に、登熟期の極端な高温は品質の悪化を招き、乳白粒や未成熟粒、割れ米、害虫の発生という結果に至る。若松ら(2007)は出穂期前 20 日間に平均気温が 27℃を超えるとき、もっとも乳白粒が発生することを発見した。Okada(2011)による気象モデルでは、気温上昇と日照時間の増加によって 21 世紀末に、日本の南部では 1 等米は 40%まで低下すると予測した。実際に、2010 年の記録的熱波で、多くの地域の 1 等米は 30-50%まで比率が低下した。

気温が農業へ与える影響については、国の研究機関においても積極的に調査・研究がなされている。2005 年度の調査(農業・生物系特定産業技術研究機構:2006)では、温暖化が原因で生育・収量・品質への影響や病害虫が発生していると回答した都道府県は 7 割を越えている(生育・収量・品質に関して 32 道府県、病害虫に関して 25 道府県)。また、温暖化を原因に移植から出穂までの生育期間を短縮しているとした都道府県も 30 あり、温暖化が水稻の生育に影響を与えることがあきらかとなっている。ほとんどの道府県で白未熟粒の発生が増加していて、約半分は原因が温暖化であるという認識を持っているとともに、対策として、移植時期の晩期化等が推奨されている。また、胴割米や高温不稔の発生増加や減収傾向、カメムシ類による斑点米の多発やカメムシの種類の変化に関する指摘が多数挙がっている。特にカメムシ類による被害を報告した道府県 14 のうち、11 府県は東海・近畿以西であり、西日本において被害の増加傾向がみられた。また、農林水産技術会議(2007)によれば、2007 年に農林水産省が行った高温障害等による農業生産への影響に関する全国調査において、水稻の高温障害や病害虫の多発が確認されている。水稻の高温障害の例として、白未熟米があり、これは玄米の全部または一部が乳白化する減少であり、出穂・開花から収穫まで

の登熟期において日平均気温が 27℃を上回ると多く発生するといわれている。この現象が、登熟期の平均気温が上昇傾向にある九州地方等で深刻な問題となっている。また、同じく高温障害の一つである、胴割米は完熟した米粒内の急激な水分変化によって内部膨縮差が大きくなったために米粒に亀裂が生じる現象であり、登熟期初期の気温が高いほど発生しやすいとされる。

これまでの地球温暖化が日本の農作物へ与える影響について予測している研究の多くは農林水産技術会議(2007)のサーベイによれば、水稻に関するものである。内容は、北海道や東北など北部における増収、九州など南部における減収が見込まれている。将来的な収量の変動予測として、2060 年代に全国平均で約 3℃気温が上昇した場合に、潜在的な水稻収量は北海道において 13%増加、東北以南では 8~15%の減収という結果が示されている。この予測は気温と日照量から計算される「気候登熟量示数」を用いて推定している。

農林水産技術会議(2007)によると、このような温暖化による農作物への影響に対して、行われている適応策は品種開発と栽培技術の開発に区分される。登熟期間の高温による白未熟粒の発生は品質の低下を招くため、問題視されている。この登熟期間の高温を避けるための有効策として、遅植えや直播栽培を行うことで登熟期間を遅らせる方法が取られているほか、肥料や移植密度の調整、早期落水の防止も適応策として効果があるとされている。また、高温時にも白未熟粒が少なく、見た目が整っている品種の開発も行われている。胴割米も登熟期初期の高温が発生要因であるため、遅植えや早期落水の防止、適期収穫が対応策として挙げられている。カメムシ類による斑点米被害に対しても、防除方法の見直しや出穂前の畦草刈り、フェロモントラップによる発生予察などの適応策が既に行われている。

農業・生物系特定産業技術研究機構(2006)は、水稻の登熟期における高温が白未熟粒の多発要因という問題に対して、水稻の作付け時期や立地条件によって、影響が異なることを指摘している。この検証のために、昭和 50 年以降のデータを用いて田植盛期、収穫盛期、登熟期間日数と高温障害の発生との関連を検証している。その結果、登熟期全体の平均気温は 27℃を下回るものの、登熟期初中期に一時的に 27℃を超えることがある北陸地方では、乳白粒や腹白粒等の発生によって品質が下がること、九州地方のように、登熟期全体で平均気温が 27℃を上回る場合には、デンプンの蓄積が阻害されることで粒の充実不足が発生することを明らかにしている。

これらの研究では、気温変化が米の収量及び品質に影響を与えることを示しているが収量と品質への影響を比較検討している研究は Kawasaki and Uchida(2016)が最初の研究である。彼らの研究の新規性は、等級検査のサンプルセレクションを考慮したこと、生物季節学に基づいた生育段階の区分ごとに気温の影響が異なる点を考慮したこと、Schlenker and Roberts(2009)が提案した非線形モデルを採用したことが挙げられる。この分析結果では、気温が閾値を超えるとときに収量や品質に影響を与える非線形な関係があること、水稻の正伊作段階によって気温の影響が異なることを明らかにした。さらに、気温の 3℃上昇時のシナリオでは、収量の増加を上回る品質の低下が発生することを指摘した。

2.3 米の等級制度について

日本では食用とされるうるち米は約 6 割が農産物検査を受検している。この検査は任意ではあるものの、規格取引の根拠として用いられるために多くの農家が受検し、出荷事業者や取引の場である米穀価格センターへ出荷される前に行われる。農産物検査は農産物検査員が目視によって、整粒割合などを基準に等級を格付けされる。このときに、被害粒や死米、着色粒、未熟粒が 1000 粒あたりに含まれている割合を規格選別の判断材料の一つとして調べている。被害粒とは、既に発芽している粒や病害粒、虫害粒、胴割粒、斑点粒を指す。また、死米とは粒の大部分が粉状で光沢が無い粒、着色粒は表面に着色がみられる粒、未熟粒は乳白粒などの登熟が不完全な粒をそれぞれ指す。検査によって、これらの粒の混入率や整粒比率等から等級が決定する（表 1）。

表 1 水稻うるち玄米の品位の規定

	最低限度		最高限度							
	整粒(%)	形質	水分	被害粒、死米、着色粒、異種穀粒及び遺物						
				計(%)	死米(%)	着色粒(%)	異種穀粒			異物(%)
							粳(%)	麦(%)	粳及び麦を除いたもの(%)	
1等	70	1等標準品	15	15	7	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2
2等	60	2等標準品	15	20	10	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4
3等	45	3等標準品	15	30	20	0.7	1	0.7	1	0.6

規格外-1等から3等までのそれぞれの品位に適合しない玄米であって、異種穀粒及び異物を50%以上混入していないもの。

出典：農林水産省「玄米の検査規格」より

2.4 米の病虫害について

農作物の病虫害は農業生産のなかで大きな損失を生み出す要因である。虫害は虫による収穫部位の食害だけではなく、葉や根を傷めることで生育阻害や、傷から病害を招くという間接的被害をもたらす。また、病害はかびや細菌、ウイルスなどの微生物による被害であり、生育阻害による収量の低下や品質の低下などの悪影響を及ぼす。

日本植物防疫協会は全国の農業試験場と協力して、防除の有無による減収、減益の比較試験を行った。その結果、水稻では平均 24%の減収、出荷金額では平均 30%の減益が病虫害等によってもたらされたと報告している（防疫協会：2008）。

日本の水稻栽培における代表的な病虫害はウンカやいもち病による収量の低下、カメムシによる品質の低下とされている。

2.4.1 カメムシ類による被害

東北地方では 2000 年ごろから斑点米が全域的な問題となり、1999 年には斑点米の発生面積が 17.6%と急増した結果、多くの水稻に落等被害が起きた。また、2002 年には夏季の

長雨と日照不足にも関わらず同様に斑点米被害が多くみられた。菊地ら(2004)は、東北地方における、斑点米カメムシ類の発生と被害実態、気象条件の関係を分析して、6~8月の平均気温と斑点米被害との間に正の相関があること、降雨日数と斑点米カメムシ類の間に負の相関があることを明らかにした。また、田淵ら(2015)は2003年から2013年における東北6県の斑点米カメムシ類の発生及び被害の実態を報告している。

斑点米カメムシによる被害は1970年代から報告されていたが、近年被害要因について研究が蓄積されている。直接的原因は、主として、水田内に侵入するカメムシ類、水田外で発生するカメムシ数が挙げられる。また、間接的影響を及ぼす生物的要因として、水田内・畦畔周辺の雑草量やイネの割れ粃率がある。割れ粃とは、玄米を包む粃殻に隙間が発生している状態を指し、この状態の水稲のときカメムシ類が吸汁しやすいため斑点米被害が増加するとされている。また、作付品種や栽培時期、殺虫剤、雑草管理などもカメムシ類の増減に影響を与える要因として指摘されている(宮田:1991、大友ら:2010)。田淵ら(2015)はカスミカメムシ類の分布拡大要因の究明や防除・換地来錯の改善が今後の課題として言及している。特に分布拡大についてはKiritani(2007)が耕作放棄地の増加に伴う寄主植物の分布と気象要因を主要因として挙げている。大友(2013)は気象要因に着目して分析した結果、東北地域におけるアカスジカスミカメムシの個体群密度に影響すると考えられる6-8月の平均気温が平年値を上回る年が複数年続く場合に密度が高まる傾向にあることを示した。他方で、気象要因のみでは分布拡大の説明がつかないため、他の諸要因を考慮した分析を行う必要性についても言及している。

大友(2013)は東北地方のアカスジカスミカメムシについて、発生状況の推移や被害、発生生態と防除に関してまとめている。カスミカメムシは地域や年次で異なるが、一般的に越冬世代成虫が6月下旬から7月上旬、第1世代成虫が7月下旬から8月上旬、第2世代成虫が8月下旬から9月下旬にイネ科雑草地で発生する。一般的に、稲の出穂・開花時に第1世代以降の成虫が水田に侵入して被害を及ぼす。また、水田内に寄主となる雑草がみられた場合には出穂前でも成虫が侵入、その後幼虫が発生する。害虫被害は害虫の発生量に左右されることが一般的であるが、カメムシ類による斑点米被害は収量被害ではなく、品質被害であるため米の収量は大きく変動しないとされる。カメムシによる品質被害粒は、米の等級検査の際に、部分着色粒として落等の原因となる。被害を与えるカメムシ類の多発要因について、各県の注意報や警報から傾向をまとめている。また、カメムシ類の発生数に加えて斑点米被害拡大要因として水田内雑草の有無と割れ粃の発生率も同等の影響があることを指摘している。

2.4.2 ウンカ類による被害

水稻被害をもたらすウンカ類は主にセジロウンカ、トビイロウンカ、ヒメトビウンカであるとされる。松村、大塚(2009)によれば、セジロウンカやトビイロウンカは長距離移動性を持ち、東南アジアで越冬した個体が季節風に乗リ、梅雨時期に日本に飛来するとされる。対してヒメトビウンカは休眠性をもち、日本国内で越冬可能とされる。

ウンカ類は水稻に、ウイルス病害であるイネ縞枯葉病を運ぶ媒介であるとともに、直接的な吸汁被害を及ぼし「坪枯れ」を引き起こすとされる。イネ縞枯葉病は新しい葉が垂れ下がり枯死したり、穂が正常に出ないなどの症状によって収量の低下を招くとされる。また、「坪枯れ」とは、水稻がまとまって不規則な円形に倒伏するだけではなく、被害が著しい場合には圃場全面が倒伏する場合もある。

水稻被害をもたらすウンカ類の発生状況は農林水産省(2011)によれば、1980-1989 年、1990-1999 年、2000-2009 年の各 10 年間の発生面積率（水稻作付面積に対する発生面積の割合）で比較すると、セジロウンカでは 47%、47%、42%、ヒメトビウンカでは 34%、35%、38%と一定の割合で発生している。トビイロウンカは 18%、13%、6%と減少傾向にあるが、2005 年以降に増加傾向にあるとされている。この違いの原因の 1 つとして、セジロウンカやヒメトビウンカは日本全国で発生しているが、トビイロウンカは西日本を中心に発生が確認されているという地域性の違いが挙げられる。

2.4.3 いもち病による被害

いもち病は低温（20-25℃）、多雨、日照不足などの条件下で発生しやすくなり、梅雨明けの 30℃を越すような高温や多照によって停滞することが明らかになっている。この停滞減少を「高温抑制」と呼び、緯度が低くて標高の低い地域ほど起こりやすいとされる。気温上昇は、この高温抑制減少が起きる地域が拡大するため、今後の気候変動によっていもち病の発生地帯は縮小するとともに北上することが予想される。いもち病の伝染源は孢子であり、昨年いもち病にかかった藁や種もみ、苗から感染する。特に穂いもちの発生は減収や品質の低下に最も影響する。

2.5 気候変動と病虫害について

大野、中村（2007）では、コメ被害をもたらすとされるミナミアオカメムシ、その近縁のアオクサカメムシの岡山県、四国における分布について調査を行っている。ミナミアオカメムシは熱帯地方が本来の生息域であり、日本は分布北限とされている。このミナミアオカメムシはアオクサカメムシに比べて年間発生回数が多く、産卵数の多いため増力率が高く、水稻生産における被害の拡大が予想される。彼らの調査結果から、都市化による気温上昇に伴うミナミアオカメムシの分布域北上の可能性が示唆されている。また、Kiritani ら(1963)の研究では 1 月の平均気温が 6~7℃の地域が生息域であり、5℃以下の地域では半数以上のミナミアオカメムシ成虫は越冬できずに死んでしまうとされている。

菅ら(2006)の報告では、2005 年に岩手県において発生した斑点米被害の主要因をアカスジカメムシと仮定して、発生量と気象要因の関係について検討している。彼らは 2005 年の気温については変動が大きく、明瞭な関係が認められないとして降水量との関係を分析した。その結果、斑点米被害要因として、第一にアカスジカメムシの孵化盛期に降水量が少なく、発生量が多かったこと、第二に水田への侵入量の増加と水田内雑草の繁茂による産卵・

発生密度が高くなったこと、第三に割れ籾の発生量が多かったために側部被害が多くなり、斑点米被害が助長されたことを指摘している。

竹内ら(2005)の調査では、出穂後の水田におけるカメムシの密度と斑点米発生数との関係およびその変動要因を明らかにすることはカメムシの要防除水準策定上きわめて重要とされる。斑点米カメムシ類密度と斑点米発生率の関係を求めるとき、通常捕虫網を用いたすくい取り調査で得られるすくい取り個体数が利用される。竹内らの研究では、試験的に水田内に設置した網枠内に卵を放し飼いたした後、孵化卵数、収穫時生存個体数を調査した。この調査結果では、推定孵化数と収穫時生存個体数、斑点米発生数の間に正の相関がみられたことが報告されている。

大江ら(2017)は、斑点米カメムシ類の一種であるクモヘリカメムシの宮城県内における誘殺分布と冬期気象条件のデータから県内の分布可能域の推定を行った。2月上旬の最高気温がその後の夏期におけるカメムシ発生に重要であることが示されている。Ogawa-Onishi and Berry (2013) や Yukawa ら (2007、2009)、Kiritani (2011) は気温上昇によって、元来東南アジアなどに生息していたミナミアオカメムシが気温上昇に伴い北上して、これまで生息していたアオクサカメムシの地域が狭まっていることを議論し、1月の平均気温が上昇すると、ミナミアオカメムシの生存越冬率が上昇して発生頭数が増えることで生息域の北限を拡大していると考えている。

Yamamura and Yokozawa(2002)はヒメトビウンカやイネ縞枯葉病の多発と温暖化について直接議論している訳ではないが、長期的な温暖化の進行とイネ縞枯葉病の発生地域の変化を比較することで、ヒメトビウンカ成虫の水田への侵入時期と水稻の田植え時期から、2060年代には東北・北陸地域においてもイネ縞枯葉病の発生が増加する可能性を指摘している。

大塚(2012)は長距離移動性を持つウンカ類のなかでも、日本に飛来するトビイロウンカやセジロウンカはベトナム北部や中国海南省など稲が周年栽培される地域で越冬するとしている。まず冬作(1~6月)や晩春作(2~6月)を行うベトナム北部で越冬したウンカ類は南西の季節風に乗れり、4月初旬に中国南部に移動して、さらに6~7月の梅雨時期に低気圧に伴う強風に乗って日本に飛来するという移動経路をとるとされる。気候変動によるベトナム北部の冬期気温上昇が越冬可能性を挙げることでウンカ類の発生量に影響している可能性があることを指摘している。

腰原(2001)は東北地方における冷夏とセジロウンカの発生について、1956-1995年のデータを用いて検証している。東北地方の水稻栽培に悪影響を与える冷夏は、オホーツク海域の寒気流入による、やませの発生に起因する全国的な低温型(オホーツク海高気圧型)と、北極寒気から流入した、北海道を中心に低温になる一方で西日本は高温に見舞われる東北低温型(北冷西暑型)に分けることができる。腰原(2001)は40年間の東北地方の水稻作柄と冷夏状況を比較した結果、明瞭な北冷西暑型の冷夏ではウンカ類の発生の可能性が高くなると言及した。

吉村ら(2004)は 2003 年の山形健の水稲作付主力品種である「はえぬき」に関して、2003 年の冷夏によって、いもち病が発生して、水稲の登熟不良が起きた結果、背白米や奇形米が増加したとともに収量が低下したということを報告している。

以上の先行研究からわかるように、気温上昇は、直接コメの生産性や品質に影響を与えるだけでなく、害虫の増加を通じて、品質に影響を与える経路を持つ。しかし、Kawasaki and Uchida(2016)では、気温が生産性及び品質に及ぼす影響を明らかにしているものの、害虫を通じた経路を識別していない。このため、気温のパラメータは、気温上昇が害虫を増加させることで、生産性や品質を低下させる効果を含んだものとなっている。気温上昇によって増加する可能性のある害虫被害を抑制することで、気温上昇の影響の緩和が可能であることを考慮すると、政策的に制御できる可能性のある除去変数を明示的に考慮して分析することで、適応策の有効性を検討する意義は大きい。

本研究では、気温上昇が農業生産性や品質にどのような影響を与えるかについて、害虫の影響を考慮することで、Kawasaki and Uchida(2016)を発展させ、気温の直接効果と害虫を通じた間接効果の影響を別々に識別することで、有効な適応策のあり方を検討する。

3.1 モデル

本研究では、穀物の収量と品質が気温などの気象条件の関数と定義して推定している。Kawasaki ら(2016)は気候変動が農業の収量と品質に与える影響を分析するにあたり、サンプルセクションや植物の季節性、気温の非線形性に留意する必要があると指摘している。それらの点を考慮したうえで、ベースとなるモデルは以下の (1) 及び (2) 式となる。

$$y_{it} = \alpha_0 + \sum_c [f_{0c}(h_{cit}) + w_{cit}\delta_{0c}] + \lambda_1 bugs_{it} I(bugs_{it} < \overline{bugs}) + \lambda_2 bugs_{it} I(bugs_{it} \geq \overline{bugs}) + \theta_i + \tau_t + u_{it} \quad (1)$$

$$s_{git} = \beta_0 + \sum_c [g_{0c}(h_{cit}) + w_{cit}\delta_{0c}] + \zeta_1 bugs_{it} I(bugs_{it} < \overline{bugs}) + \zeta_2 bugs_{it} I(bugs_{it} \geq \overline{bugs}) + \beta_I \lambda [\Phi^{-1}(I_{it})] + \mu_i + \psi_t + v_{it} \quad (2)$$

上の式の y は各都道府県の米の収量 (kg/10a)、 s は検査された米の等級シェア (%) である。 i は各都道府県を、 t は年次、 g は米の各等級、 c は米の生育段階を示す。気温が作物に与える影響は、生育段階によって異なるため、作物の生育段階を三段階に区分して、各段階における気温を考慮した定式化を行っている。具体的には、第一段階は田植最盛期から出穂最盛期の 3 週間前まで、第二段階は出穂最盛期の 3 週間前から出穂最盛期まで、第三段階は出穂最盛期から刈取最盛期までとなっている。 $f(h)$ 、 $g(h)$ は気温 h の関数であり、気温が生産性や品質に与える影響を表している。 w は、他の気象条件 (降水量、降水量の 2 次項、日照時間、日照時間の 2 次項、風速 15m/s 以上の日数) の変数、 $bugs$ はカメムシやウンカ、

いもち病被害率(被害収量/被害発生延べ農地面積)、 $\overline{\text{bugs}}$ は病虫害変数の中央値、 $I(\text{bugs}_{it} < \overline{\text{bugs}})$ は i 県 t 年の病虫害被害率が中央値以下のときに 1 をとるダミー変数、 $I(\text{bugs}_{it} \geq \overline{\text{bugs}})$ は同様に病虫害被害率が中央値より大きいときに 1 をとるダミー変数、 $\lambda(\cdot) \equiv \phi(\cdot)/\Phi(\cdot)$ は逆ミルズ比であり、 Φ は米の各等級検査率 I_{it} の分布関数、 ϕ は米の各等級検査率 I_{it} の密度関数である。 θ は時間不変の特徴を捉えるための都道府県特有の個別効果、 τ は年ダミー、 u は誤差項となる。このとき、 $f(h)$ 、 $g(h)$ のパラメータは気温上昇による稲の生産量や品質に与える影響を意味するが、植物の生育に関する影響に加えて農家の田植え時期の変更など、気温変化への対応策を行うことの影響も含んでいる。病虫害の影響について、ある閾値までは被害が許容されるがその閾値を上回ると顕著に被害が現れるような、非線形の関係性を持つ可能性を考慮して、病虫害の変数がそれぞれ中央値以下のとき、中央値以上のときで異なる係数をもつようなモデルとした。

逆ミルズ比 $\lambda(\cdot)$ を変数に加えた理由は、米は収穫されたものすべてが等級検査にかけられる訳ではないからサンプルセクションバイアスを引き起こす可能性があるからである。一般的には Heckman (1979) のサンプルセクションモデルを用いるが、この方法はそれぞれの主体 i が観測されるか否かの二項選択のデータが必要とされるが、本分析では都道府県レベルにデータが集計されているため適用できない。Blundel and Stocker(2005)はこの問題に対して、集計された等級シェアと検査率を用いて逆ミルズ比を計算することでサンプルセクションバイアスに対応する可能であると示した。

f 及び g の関数については、ステップ関数を想定した場合のケースについて定式化している。ステップ関数については、気温が生産性や品質に与える影響が非線形であることを考慮した定式化となっている。

ステップ関数を想定した定式化の場合、各生育段階の期間において、日平均の気温を気温を 3°C ごとに区分したカテゴリーに分類し、カテゴリー別にそのカテゴリーに分類される日数を計算したものを変数としている。たとえば、 $D_{c21:24}$ は、生育段階 c の期間において、日平均気温が $21\sim 24^{\circ}\text{C}$ になった日の日数を表す変数である。この結果、生育段階 c の期間における f_{0c} 及び g_{0c} の関数は下記のように表される。

$$f_{0c} = \gamma_{c9:12}D_{c9:12} + \gamma_{c12:15}D_{c12:15} + \cdots + \gamma_{c30:33}D_{c30:33} + \gamma_{c34\text{over}}D_{c34\text{over}} \quad (3)$$

$$g_{0c} = \xi_{c9:12}D_{c9:12} + \xi_{c12:15}D_{c12:15} + \cdots + \xi_{c30:33}D_{c30:33} + \xi_{c34\text{over}}D_{c34\text{over}} \quad (4)$$

ここで、害虫被害率 bugs は気象変数の関数であることを考慮し、以下の(5)式のモデルを推定する。(1)、(2)の結果と(5)の結果を組み合わせることで気候変動が害虫被害を促すという経路で農作物に負の影響を与えているかを検証できる。

$$\text{bugs}_{it} = \rho X_{it} + \theta_i + T_t + \epsilon_{it} \quad (5)$$

bugs は(1)、(2)と同じカメムシ被害率やウンカ被害率、いもち病被害率、 X は各都道府県の 5 月から 10 月の月別平均気温を用いた。 θ は各都道府県の個別効果、 T は年次の年ダミーである。これまでの先行研究では気温上昇はカメムシの生育促進や世代交代を早める要因であること、孵化後に成虫になるまで水田周辺のイネ科雑草で増殖するとされているため、これらの説明変数を使用した。なお、以下の分析では、害虫被害率に影響を及ぼす大きな要因として、気象要因以外には、農薬の利用量（以下の分析では、誤差項に含まれている）などが考えられる。しかし、これらの要因は、農業生産性や品質に影響を与えるものではない。また、気温以外の気候風土や土地の性質などは生産性や品質に影響を与えるとともにカメムシの生育にも影響を与えるかもしれない。しかしこれらの要因は、それぞれの式の固定効果で考慮されている。以上のような状況から、(5) 式の誤差項と (1) 式と (2) 式の誤差項は相関しないと考えられる。したがって、以下の分析では、 IV を使わず、(5) 式は、(1)、(2) 式と独立して推計する。

4. データ

本分析に用いた水稻生産に関する 2008-2017 年の都道府県レベルパネルデータは農林水産省が公開している統計資料から作成した。水稻生産の収量、作付面積、耕種期日、病虫害被害面積は作物統計調査¹から、等級比率は「米穀の農産物検査結果」²から集めた。政府調査による収量（生産量/作付面積）データは、全国約 290 万単位区（20m 四方）の耕地の筆を地目階層（田のみ、田畑混在、畑のみ）及び性格階層（圃場整備・未整備、水田率などの指標に基づいて設定される地目階層のカテゴリー）で区分した集団から、系統抽出法によって抽出された全ての筆について、調査される結果から都道府県ごとに集計される。

ここでいう「被害」の定義とは、圃場において栽培を開始してから収穫するまでの間に農作物に損傷を生じて、基準収量（被害が発生しなかったと仮定した場合に収穫されうると見込まれる収量）より減収した状態を指している。

また、気象データに関しては各市区町村の役場の緯度経度に最も近い、気象庁が公開しているアメダス観測所のデータ³を代入することで市区町村ごとの日次気象データを作成した後、市区町村別の米作付面積で加重平均して県レベル日次データを集計した。アメダス観測所がない市区町村に関しては近隣市区町村のうち、最も近い観測所のデータを採用している。気象条件として、平均気温、降水量、日照時間、最大風速 15m/s 以上日数を分析に用いた。各日時レベルのデータを集計した後、作物統計調査に記載されている各都道府県の耕種期日に従った、水稻の生育段階別に集計を行った。ここで用いた生育段階は、都道府県

¹ http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html

² <http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/>

³ <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

の田植期、出穂期、刈取期の最盛期（調査年に特定段階に作付面積の 50%が達した期日）を基準に構成した。第 1 段階は田植最盛期から出穂最盛期の 3 週間前まで、第 2 段階は第 1 段階の翌日から出穂最盛期まで、第 3 段階が出穂最盛期から刈取最盛期までの区分となる。これはそれぞれ、幼穂形成まで、出穂・開花まで、登熟・収穫までの期間を表している。

表 2 記述統計

変数			観測数	平均	標準偏差	最小	最大
収量(kg/10a)			470	512.868	48.255	293.22	634.1
等級比率	1等米比率		470	63.489	26.774	0	98
等級検査率			470	0.472	0.201	0.027	0.924
生育段階	第1段階	気温（日平均気温）	460	22.641	2.314	16.239	27.124
		降水量（mm/日）	460	6.757	3.822	1.468	26.132
		日照時間（時間/日）	460	4.154	0.973	1.843	7.512
		強風日（日）	460	0.034	0.027	0	0.191
	第2段階	気温（日平均気温）	470	24.275	3.289	8.935	29.864
		降水量（mm/日）	470	4.836	3.249	0.221	17.904
		日照時間（時間/日）	470	4.68	1.335	0.873	8.666
		強風日（日）	470	0.023	0.028	0	0.161
	第3段階	気温（日平均気温）	470	21.691	3.646	14.032	28.67
		降水量（mm/日）	470	5.759	2.708	0.792	23.99
		日照時間（時間/日）	470	4.376	0.892	1.691	8.312
		強風日（日）	470	0.037	0.026	0	0.169
5月平均気温			470	17.693	2.092	9.758	26.361
6月平均気温			470	21.177	1.794	14.725	28.994
7月平均気温			470	25.405	1.621	18.437	29.935
8月平均気温			470	26.186	1.686	19.59	30.143
9月平均気温			470	22.411	1.992	15.523	29.118
10月平均気温			470	16.895	2.493	8.444	27.568
病害虫	作付面積あたりカメムシ被害率		470	0.082	0.077	0	0.529
	作付面積あたりウンカ被害率		470	0.068	0.085	0	0.596
	作付面積あたりいもち病被害率		470	0.2	0.144	0	0.758

注:沖縄のみ第1段階が2月下旬であり、今回4月から10月の日次気温を取得・変数作成を行っているため欠落している。

その他の変数は2008年から2017年までの46都道府県のデータである。（沖縄県を除く）

表 2 は本分析に使用している被説明変数および説明変数の基本統計量である。分析対象は 2008 年から 2017 年の日本 47 都道府県である。気温、病虫害被害に関してデータが一部欠損値となっているため、不完全なパネルデータである。分析期間の平均収量は 10a あたり約 512kg、1 等米比率がおおよそ 6 割を占めている。各等級比率の最小値が 0 をとることから、年によっては 1 等米が全く生産されない都道府県も存在している。生育段階の第一段階は田植後から幼穂形成期までであり、5 月下旬から 7 月上旬、第二段階が幼穂形成後

から出穂最盛期までの夏期、第三段階が出穂後から刈取までのため、第二段階が気温、日照時間ともピークとなる。冬期の月平均気温は 4℃から 6℃だが、最低気温は氷点下となり、カメムシ類の越冬が困難な気温となっている。また、病虫害被害について水稻作付面積のうち、カメムシが 8%程度、ウンカが 6%程度、いもち病が 20%程度被害を与えていることがわかる。

5. 推計結果

5.1 推定結果

表 3 は気温と収量の非線形な関係性についてステップ関数を用いて推定した結果となる。表 3 の(1)が収量に関して病虫害変数をすべて含めたもの、(2)がカメムシ被害率のみ、(3)がウンカ被害率のみ、(4)がいもち病被害率のみを含んだモデルである。収量に関して田植期から穂形成期までの期間（第一段階）の 24℃以上の高気温帯の日数が増加すると収量が低下する可能性が示唆された。特に 24℃以上の高気温帯については、気温が上昇するほど収量への負の影響が大きくなることが示されている。一般的にこの期間の高温は苗の分けつ促進や養分吸収など収量の増加につながりやすいが、他方で過剰な生育によって茎が育ちすぎることによる収量低下も招きうるとされ、本分析結果では後者の過剰生育の影響を示唆しているものと考えられる。穂形成期から出穂期までの期間（第二段階）では 15-21℃の低気温帯の日数については、有意に負であり、この気温帯の日数が増加するような冷夏では収量が下がるといえる。この期間の冷温障害として活着（田植え後に根を張る）不良や分けつ期の茎数の減少、幼穂形成の遅延などが知られる。一方、30℃を超える気温帯の日数の増加は負の影響が示唆されたが有意ではなかった。出穂期から刈取期までの期間（第三段階）では 9-15 度の低気温帯の日数は有意に負であった。このことから、この気温帯の日数が増えたと収量が下がるといえる。この出穂期以降に冷温の場合には出穂遅延や負受精、開花不能、登熟不良や登熟停止などが挙げられる。一方、30℃を超える気温帯の日数は負であり、有意となった。このことから、30℃を超える気温帯の日数の増加は高温障害を引き起こす傾向がみられた。したがって、収量に関しては稲穂の形成段階以降に冷夏が生産性を下げることが、高温現象が発生した場合には有意に負の影響を与えないこととなった。

一方、病虫害変数の影響をみると、カメムシは有意ではなかった。また、ウンカ、いもち病については、閾値（中央値）以上の被害率のみ、統計的に有意な負の影響を収量に与えていることが示された。これらは、カメムシと違い、水稻の出来具合と関わらず稲穂の形成期に被害をもたらすため、マイナスの影響を示していると考えられる。

表 3 気温が水稻の収量に与える影響の推定結果

変数	(1) 収量		(2) 収量		(3) 収量		(4) 収量	
気温								
9-12(第一段階)	-0.183	(0.762)	-0.665	(0.783)	-0.553	(0.774)	-0.59	(0.773)
12-15(第一段階)	0.41	(0.511)	0.516	(0.531)	0.497	(0.521)	0.348	(0.52)
15-18(第一段階)	-0.485	(0.433)	-0.586	(0.449)	-0.593	(0.441)	-0.696	(0.439)
18-21(第一段階)	-0.474	(0.453)	-0.579	(0.471)	-0.563	(0.463)	-0.663	(0.462)
21-24(第一段階)	-0.549	(0.489)	-0.557	(0.509)	-0.618	(0.501)	-0.659	(0.5)
24-27(第一段階)	-0.871*	(0.516)	-0.864	(0.536)	-0.922*	(0.529)	-0.972*	(0.527)
27-30(第一段階)	-0.908*	(0.536)	-1.050*	(0.554)	-0.888	(0.55)	-1.217**	(0.546)
30-33(第一段階)	-5.016***	(1.425)	-5.180***	(1.479)	-5.043***	(1.459)	-5.588***	(1.455)
15-18(第二段階)	-6.087***	(1.584)	-6.259***	(1.645)	-6.137***	(1.618)	-5.727***	(1.617)
18-21(第二段階)	-1.598***	(0.573)	-1.546***	(0.592)	-1.715***	(0.587)	-1.360**	(0.584)
21-24(第二段階)	-0.084	(0.265)	-0.031	(0.274)	-0.139	(0.272)	0.01	(0.27)
24-27(第二段階)								
27-30(第二段階)	0.203	(0.188)	0.177	(0.191)	0.321*	(0.191)	0.095	(0.19)
30-33(第二段階)	-0.876	(0.777)	-1.055	(0.798)	-0.722	(0.791)	-1.164	(0.79)
9-12(第三段階)	-2.522*	(1.363)	-2.844**	(1.404)	-2.105	(1.397)	-3.248**	(1.387)
12-15(第三段階)	-1.126*	(0.63)	-1.390**	(0.654)	-1.200*	(0.647)	-1.318**	(0.644)
15-18(第三段階)	0.176	(0.379)	0.094	(0.392)	-0.021	(0.387)	0.178	(0.388)
18-21(第三段階)	0.145	(0.34)	0.058	(0.353)	0.067	(0.348)	0.116	(0.348)
21-24(第三段階)	0.191	(0.357)	0.014	(0.369)	0.084	(0.365)	0.048	(0.364)
24-27(第三段階)	0.305	(0.372)	0.208	(0.385)	0.272	(0.381)	0.181	(0.38)
27-30(第三段階)	0.472	(0.42)	0.481	(0.436)	0.527	(0.43)	0.391	(0.43)
30-33(第三段階)	-1.662*	(0.872)	-1.598*	(0.906)	-1.523*	(0.895)	-1.607*	(0.893)
カメムシ被害率(<50%)	-22.505	(43.795)	-21.373	(45.487)				
カメムシ被害率(>50%)	25.807	(17.782)	31.967*	(18.416)				
ウンカ被害率(<50%)	-102.34	(79.815)			-115.647	(81.803)		
ウンカ被害率(>50%)	-54.926***	(12.906)			-53.529***	(13.257)		
いもち病被害率(<50%)	-2.811	(18.278)					-6.287	(18.598)
いもち病被害率(>50%)	-24.943***	(8.887)					-26.789***	(9.017)
逆ミルズ比								
観測数	460		460		460		460	
R2	0.494		0.446		0.46		0.462	
調整済みR2	0.361		0.307		0.325		0.327	
F値	6.962***		6.288***		6.658***		6.710***	

括弧内は頑健な標準誤差。*、**、***、はそれぞれ10%、5%、1%水準で有意。

いずれのモデルも年次及び地域に関する固定効果を含む。

以上から、気温上昇による冷夏のリスクの減少は、むしろ生産性にプラスに働く可能性がある一方で、高温による生産性へのマイナスの影響があることに加えて、害虫の増加による負の影響は収量に影響している可能性があることが明らかになった。このことから、害虫防除による適応策の実施によって、気温上昇の影響を一部緩和できる可能性があることが分

かった⁴。

次に、表 4 の品質に与える影響を見てみよう。表 3 同様に、(1)が収量に関して病虫害変数をすべて含めたもの、(2)がカメムシ被害率のみ、(3)がウンカ被害率のみ、(4)がいもち病被害率のみを病虫害変数として用いたものである。1 等米比率に関して、田植期から穂形成期までの第一段階では 18℃から 30℃までの区分はそれぞれ 5%水準あるいは 10%水準で負の影響が有意にみられた。したがって、田植から穂形成期までの育苗段階で気温の高い日数が増えると高温障害によって葉先が枯死する生育不良が発生することと関連している可能性がある。また、穂形成期から出穂期までの第二段階では 30℃以上の真夏日となると負の影響がみられた。また、第三段階である出穂期以降の高温障害として 27-30℃の気温区分が 5%水準、30-33℃の気温区分が 1%水準でマイナスに有意であることは 27℃以上の日数が増加すると登熟不良によって 1 等米比率を下げると考えられる。これらの結果をまとめると各生育段階で高気温の日数の増加は 1 等米比率を低下させる効果を持つことが明らかとなった。

カメムシ被害率は閾値（中央値）以上、以下ともマイナスに有意な結果となった。したがって、カメムシ被害は水稻の品質を低下させること、カメムシの密度によって影響の程度が異なる可能性があることが示された。ウンカ被害率やいもち病被害率について、統計的に有意な結果とはならなかった。したがって、収量とは異なり、品質に関してカメムシ被害のみが負の影響を及ぼし、ウンカやいもち病は等級には影響を及ぼさないという結果となった。

⁴ 病虫害変数の有無による係数の違いについては Appendix 参照

表 4 気温が水稻の品質に与える影響の推定結果

変数	(1) 1等級比率		(2) 1等級比率		(3) 1等級比率		(4) 1等級比率	
気温								
9-12(第一段階)	0.233	(0.58)	0.308	(0.571)	0.351	(0.575)	0.359	(0.575)
12-15(第一段階)	-0.479	(0.389)	-0.482	(0.386)	-0.377	(0.387)	-0.381	(0.387)
15-18(第一段階)	-0.526	(0.33)	-0.503	(0.328)	-0.442	(0.327)	-0.445	(0.327)
18-21(第一段階)	-0.687**	(0.346)	-0.674*	(0.344)	-0.622*	(0.345)	-0.624*	(0.344)
21-24(第一段階)	-0.946**	(0.373)	-0.928**	(0.371)	-0.891**	(0.372)	-0.910**	(0.372)
24-27(第一段階)	-0.763*	(0.393)	-0.478*	(0.391)	-0.718*	(0.393)	-0.744*	(0.392)
27-30(第一段階)	-0.920**	(0.408)	-0.887**	(0.403)	-0.893**	(0.408)	-0.896**	(0.406)
30-33(第一段階)	-1.366	(1.085)	-1.284	(1.078)	-1.438	(1.084)	-1.444	(1.082)
15-18(第二段階)	-0.487	(1.205)	-0.566	(1.198)	-0.389	(1.201)	-0.328	(1.202)
18-21(第二段階)	0.405	(0.436)	0.382	(0.431)	0.347	(0.436)	0.357	(0.434)
21-24(第二段階)	0.208	(0.202)	0.19	(0.2)	0.196	(0.202)	0.182	(0.201)
24-27(第二段階)								
27-30(第二段階)	-0.108	(0.143)	-0.091	(0.14)	-0.108	(0.142)	-0.1	(0.142)
30-33(第二段階)	-1.861***	(0.593)	-1.748***	(0.583)	-1.912***	(0.588)	-1.943***	(0.589)
9-12(第三段階)	-0.85	(1.037)	-0.752	(1.023)	-0.87	(1.037)	-0.837	(1.031)
12-15(第三段階)	0.496	(0.48)	0.52	(0.477)	0.474	(0.481)	0.48	(0.479)
15-18(第三段階)	0.164	(0.289)	0.159	(0.286)	0.17	(0.287)	0.156	(0.288)
18-21(第三段階)	-0.118	(0.259)	-0.116	(0.258)	-0.14	(0.259)	-0.144	(0.259)
21-24(第三段階)	-0.063	(0.273)	-0.052	(0.27)	-0.077	(0.272)	-0.078	(0.272)
24-27(第三段階)	-0.154	(0.284)	-0.128	(0.282)	-0.148	(0.284)	-0.162	(0.284)
27-30(第三段階)	-0.653**	(0.321)	-0.624*	(0.319)	-0.648**	(0.321)	-0.667**	(0.321)
30-33(第三段階)	-2.847***	(0.668)	-2.801***	(0.665)	-2.822***	(0.669)	-2.844***	(0.669)
カメムシ被害率(<50%)	-71.829**	(33.384)	-73.963**	(33.197)				
カメムシ被害率(>50%)	-24.639*	(13.699)	-23.967*	(13.589)				
ウンカ被害率(<50%)	32.233	(60.724)			38.242	(60.735)		
ウンカ被害率(>50%)	5.026	(9.829)			5.193	(9.853)		
いもち病被害率(<50%)	-12.875	(13.924)					-14.211	(13.833)
いもち病被害率(>50%)	-6.292	(6.761)					-6.54	(6.704)
逆ミルズ比	-41.897	(28.428)	-40.96	(28.153)	-34.925	(27.974)	-34.874	(28.072)
観測数	460		460		460		460	
R2	0.540		0.538		0.532		0.533	
調整済みR2	0.416		0.42		0.413		0.414	
F値	8.163***		8.876***		8.665***		8.693***	

括弧内は頑健な標準誤差。*、**、***、はそれぞれ10%、5%、1%水準で有意。

いずれのモデルも年次及び地域に関する固定効果を含む。

表 5 気温が病虫害発生に与える影響の推定結果

変数	害虫被害(カメムシ)		害虫被害(ウンカ)		病害(いもち病)	
5月平均気温	0.002	(0.005)	0.011*	(0.007)	-0.023**	(0.010)
6月平均気温	0.008*	(0.004)	-0.021***	(0.006)	0.002	(0.009)
7月平均気温	0.003	(0.004)	0.022***	(0.006)	-0.022**	(0.009)
8月平均気温	0.007*	(0.004)	0.001	(0.006)	-0.023***	(0.008)
9月平均気温	0.003	(0.004)	0.001	(0.005)	-0.015*	(0.008)
10月平均気温	-0.007	(0.004)	-0.005	(0.006)	-0.005	(0.009)
観測数	460		460		460	
R2	0.09		0.271		0.274	
調整済みR2	-0.046		0.162		0.165	
F値	2.685***		10.095***		10.245***	

括弧内は頑健な標準誤差。*、**、***、はそれぞれ10%、5%、1%水準で有意。

いずれのモデルも年次及び地域に関する固定効果を含む。

表 5 は気温上昇が病虫害発生に与える影響をみるため (5) 式を推定した結果となる。表 5 水稻の田植が行われる 5 月から刈取が終わる 10 月までの月別平均気温とカメムシ被害率、ウンカ被害率、いもち病被害率の関係を推定している。カメムシ被害率について、6 月、8 月平均気温がプラスに有意、年間を通して 1℃上がる場合には、被害率が 1.5%上昇することがわかる。ウンカ被害率についての結果では、各月の平均気温とウンカ被害率には 5、7 月平均気温の上昇によって被害率が上昇すること、6 月平均気温の上昇によって被害率が低下することが有意に示された。いもち病被害率については、5、7～9 月の平均気温上昇が有意に負の影響をもっているため、気温上昇によっていもち病が起これにくくなると考えられる。いもち病は一般的に冷夏の年に発生するといわれているため、この結果は妥当であると考えられる。

5.2 将来的な気温上昇による影響

表 3、表 4 の(1)の推定結果を用いて、将来的に 2010 年基準で 2050 年までに日本において 2.1℃気温が上昇する場合の収量および品質への影響を計算する。計算の結果、図 1 や図 2 のように、地域によって影響は異なることがわかる。図 1 は収量に関して 2.1℃気温上昇したときの影響を図示したものであり、低気温帯日数の減少と高気温帯日数の増加をそれぞれ、青色とオレンジ色で示している。北海道、東北地方では低気温帯の日数が減少するプラスの効果が高気温帯の日数増加によるマイナスの効果を上回っているため、収量が増加すると考えられる。他方で東北以南では、元々冷害による被害が少なかったためか、気温上昇によるマイナスの影響が大きく、収量が低下すると考えられる。日本全体では、これらの効果を平均すると 10a あたり約 18kg の減収であり、現在の平均収量 512.9kg/10a と比較

すると、およそ 3.4%収量が低下する。

図 1 都道府県別気温上昇時の収量への影響

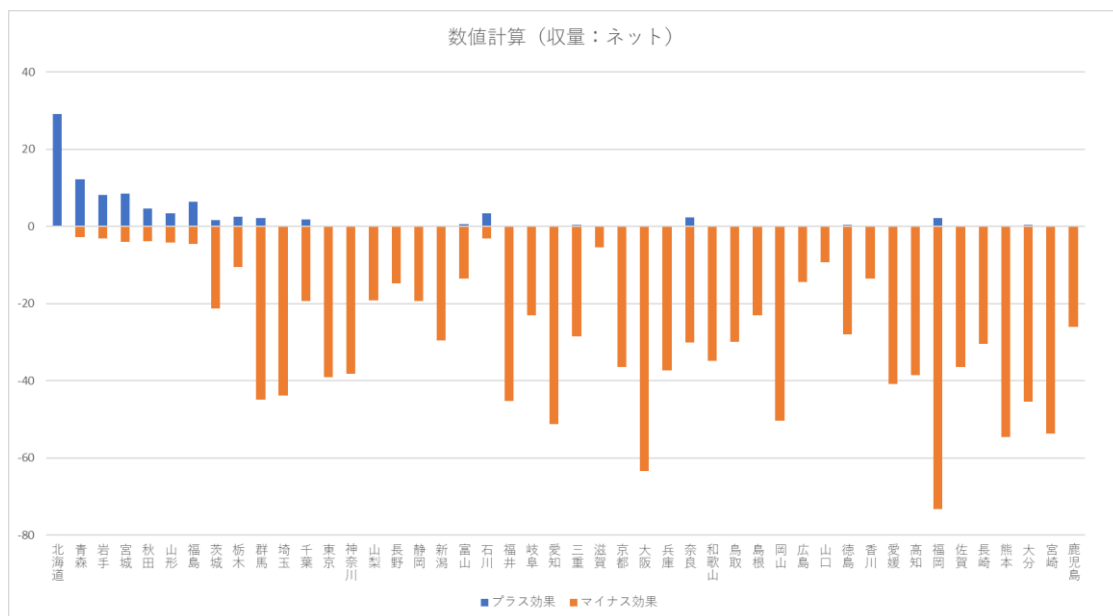
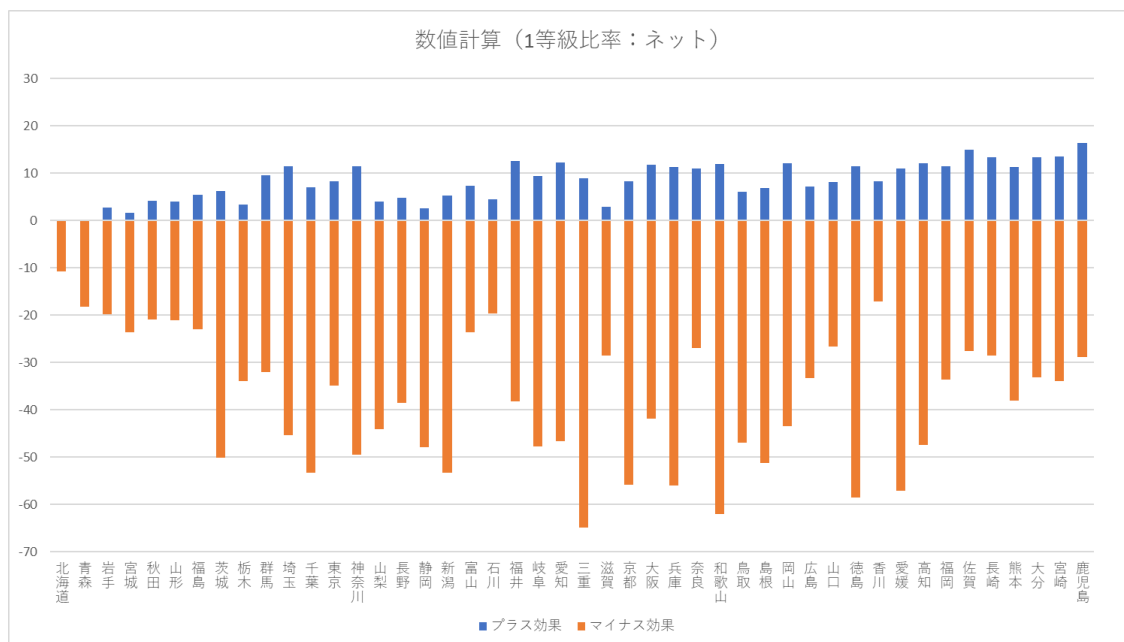


図 2 は図 1 同様気温が 2.1℃上昇したときに、1 等級比率に与える影響を計算したものである。収量と異なり、すべての都道府県においてマイナスの効果が上回っているため、地域差はあるものの、気温上昇による水稻の品質低下は日本全体で発生すると考えられる。

したがって、気温が 2.1℃上昇した場合の 1 等級米比率の低下率が平均 29.5%、収量に換算すると 2 等級米以下の水稻が 10a あたり約 152.5kg 増える計算となる。

図 2 都道府県別気温上昇時の品質への影響



最後に、気温上昇による直接的な影響と、病虫害発生増に伴う間接的な影響を比較すると、収量に関して気温の直接的な影響は平均して約 **25kg/10a** の減収に対して病虫害発生による減収は平均 **89kg/10a** となり、病虫害由来の減収の影響は非常に大きいものといえる。また、品質については、直接的な気温上昇の 1 等級米比率への影響は平均 **29.5%** 低下、間接的な病虫害発生による影響は平均 **0.8%** の低下となる。したがって、収量と異なり品質については病虫害の影響は小さいものといえる。

病虫害の影響は水稻の収量、品質ともに対して少なからず負の影響がみられるため、病虫害の防除を行うことで発生を抑制すると、特に収量の低下幅を小さくすることができる。この点で、これまで気候変動と農業について議論されてきた温室効果ガスの抑制や作物の添削、作付時期の変更のみならず、より効果的な病虫害防除対策が、米生産に対する気候変動の適応策の 1 つとして重要であると考えられる。

6 結論

近年、気候変動に関する問題意識は世界的に高まるとともに、温室効果ガスの削減などの緩和策と温暖化を前提としたうえでの適応策の両方の推進が議論されている。気候変動の影響を受ける産業の一つである、農業に関して日本を含めて様々な国を対象とした分析がなされている。

日本を対象とした分析のなかで、気候変動による農作物への影響について、水稻収量の東日本における増産と西日本における減収が示されてきた。また、Kawasaki and Uchida(2016)以降、収量のみならず品質に対する影響についても研究を行い、気温が収量

やコメの品質を低下させることを明らかにしている。しかし、これらの推計結果では、気温と相関するさまざまな変数が制御されていないために、気温によるそれらの影響を通じた間接的な効果も含めた推計となっている。しかし、間接的な効果の中には、本分析で扱った害虫のように、政策的に制御できる可能性のある要因がある。このような要因がある場合には、それらを明示的に考慮した分析によって、適応策によってそれらの変数を制御することで、気温の影響を緩和できる可能性を分析できる。

本分析では、気温と水稻の収量・等級比率に加えて病虫害被害率のデータを用いることによって気温が水稻の生育に直接的に与える影響と、病虫害を促進することで間接的に収量や品質に与える影響について明らかにした。ステップ関数を用いた分析では、低気温の日数と高気温の日数の増加が収量や品質に悪影響を及ぼすこと、収量に関して低気温日数の減少によるプラスの効果と高気温日数の増加によるマイナスの効果の両方がみられることがわかった。一方、病虫害の影響については、ウンカやいもち病は収量に対して、マイナスの影響を及ぼす一方、米の品質に対しては有意な影響を与えないこと、カメムシは収量には有意な影響を与えない一方で、品質に対しては有意にマイナスの影響を与えることが分かった。病虫害による被害発生と気温との関係を分析した結果、気温の上昇は病虫害の被害発生を増やすことも明らかとなった。このため、気温上昇は、病虫害被害の増加を通じて収量や品質にマイナスの影響を与えることが明らかとなった。

以上の推計結果を用いて、日本で 2.1°C 気温上昇が起こった（2050 年の想定）場合の、収量及び品質に対する直接効果及び、害虫を通じた間接効果をシミュレーションした結果、気温上昇による害虫被害を通じた収量への間接効果は、収量への直接効果と比べて 3 倍程度大きく、気温上昇による収量へのマイナス影響の 77% が気温上昇による害虫被害の増加を通じた効果であることが分かった。このことから、より効果的な害虫対策を実施できれば、米への影響を大幅に小さくできることが明らかとなった。なお、害虫を明示的に考慮していない Kawasaki and Uchida (2016) の結果と比較すると、大きな結果の違いは見られなかった。また、米の品質については、低気温の日数の増加や高気温の日数の増加は、主に、一等米比率を減少させることが統計的に有意に示され、病虫害の増加によって一等米比率が低下するという関係はカメムシのみ有意に示すことができた。気温上昇は高温を増加させる効果があり、米の品質を低下させることが明らかとなった。

【謝辞】

本研究は、(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20S11819) により実施した。

参考文献

- Adams, R. M. (1989) "Global climate change and agriculture: an economic perspective", *American Journal of Agricultural Economics*, 71(5), 1272-1279
- Adams, R. M., Fleming, R. A., Chang, C. C., McCarl, B. A., Rosenzweig, C. (1995) "A reassessment of the economic effects of global climate change on U.S. agriculture", *Climatic Change*, 30, 147-167
- Blundell, R., and T. M. Stocker (2005). "Heterogeneity and Aggregation", *Journal of Economic Literature*, 43: 347-391
- Burke, M., Emerick, K. (2016) "Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture", *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3), 106-140
- Dell, M., F. Jones, B., A. Olken, B. (2012) "Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century", *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66-95
- Deschênes, O., Greenstone, M. (2007) "The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather." *American Economic Review*, 97 (1): 354-385.
- Feng, S., Oppenheimer, M., Schlenker, W. (2012) "Climate Change, Crop Yields, and Internal Migration in the United States" National Bureau of Economic Research Working Paper 17734
- Guiteras, R. (2009) "The Impact of Climate Change on Indian Agriculture", Unpublished
- Hornbeck, R. (2012) "The enduring impact of the American Dust Bowl: short and long-run adjustments to environmental catastrophe", *American Economic Review*, 102, 1477-507
- Iizumi Toshichika, Yokozawa Masayuki, Nishimori Motoki (2011). "Probabilistic evaluation of climate change impacts on paddy rice productivity in Japan", *Climatic Change* 107: 391-415
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) "Climate Change (2014) : Impacts, Adaption, and Vulnerability. Summary for Policymakers", Cambridge University Press.
- 【上記ウェブサイト翻訳版】：環境省（2014）「IPCC第5次評価報告書 第2部作業部会報告書 政策決定者向け要約（翻訳版）」：
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th_pdf/ar5_wg2_spmj.pdf（閲覧日：2020年3月2日）
- 菅 広和, 大友 令史, 鈴木 敏男 (2006). 「2005年岩手県における斑点米多発要因」, 日本病害虫研究会報, 57: 118-121
- Kawasaki Kentaro, Uchida Shinsuke (2016). "Quality matters more than quantity: Asymmetric temperature effects on crop yield and quality grade", *American Journal*

of Agricultural Economics, 98(4): 1195-1209

菊地 淳志, 菅野 洋光, 木村 利幸, 後藤 純子, 小野 亨, 新山 徳光, 滝田 雅美, 松木 伸浩, 大場 淳司, 堀末 登 (2004). 「東北地域における斑点米カメムシ類の発生と被害実態調査」, 東北農業研究センター研究報告, 102: 101-180

Kim, Sang Sook, Se Eun Lee, Oui Woung Kim, Dong Chul Kim (2000). “Physicochemical Characteristics of Chalky Kernels and Their Effects on Sensory Quality of Cooked Rice”, Cereal Chemistry, 77: 376-379

腰原 達雄 (2001) 「東北地方のセジロウンカの発生と冷夏」, 北日本病害虫研究会報, 52, 163-167

Kiritani Keizi (1963) “Oviposition habit and effect of parental age upon the post-embryonic development in the southern green stink bug, *NEZARA VIRIDULA*”, 日本生態学会, 13(3), 88-96

Kiritani Keizi (2007). “The impact of global warming and land-use change on the pest status of rice and fruit bugs (Heteroptera) in Japan”, Global Change Biology, 13: 1586-1595

Kiritani Keizi (2011) “Impacts of global warming on *Nezara viridula* and its native congeneric species”, Journal of Asia-Pacific Entomology, 14: 221-226

松村 正哉, 大塚 彰 (2009) 「ヒメトビウンカとイネ縞葉枯病の近年の発生状況」, 植物防疫, 63(5), 293-296

Mendelsohn, R., D. Nordhaus, W., Shaw, D. (1994) “The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis”, American Economic Review, 89(4), 753-771

宮田 将秀 (1991). 「アカスジメクラガメによる斑点米に対する割れ粍の影響」, 北日本病害虫研究会報, 42: 106-108

Moore, F. C., B. Lobell, D. (2015) “The fingerprint of climate trends on European crop yields”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 11, 2670-75

日本植物防疫協会 (2008). 「病害虫と雑草による農作物の損失」

農業・生物系特定産業技術研究機構 (2006). 「農業に対する温暖化の影響の現状に関する調査」, 研究調査室小論集, 7

農林水産技術会議 (2007). 「地球温暖化が農林水産業に与える影響と対策」, 農林水産研究開発レポート, 23

農林水産省消費・安全局植物防疫課 (2011) 「我が国におけるウンカ類の発生状況及び防除について」, NIAS シンポジウム「ポストゲノム時代の害虫防除研究のあり方」第4回—ウンカ防除の現状と展望—講演要旨

大江 高穂, 高城 拓未, 横堀 亜弥, 加進 丈二 (2017) 「宮城県におけるクモヘリカメムシのメッシュ農業気象データを用いた分布地域の推定」, 北日本病害虫研究会報,

68:247-252

- Ogagwa-Onishi Yuko, Pam M. Berry (2013) “Ecological impacts of climate change in Japan: The importance of integrating local and international publications”, *Biological Conservation*, 157:361-371
- Okada Masashi, Izumi Toshichika, Hayashi Yousay, Yokozawa Masayuki (2011). “Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan”, *Journal of Agricultural Meteorology*, 67: 285-95
- 岡本 正弘 (1994). 「炊飯米の粘りに関連する化学成分の育種学的研究」, 中国農業試験場研究報告, 14: 1-68
- 大野 裕史, 中村 圭司 (2007). 「ミナミアオカメムシ(*Nezara Viridula*)とアオクサカメムシ(*N. antennata*)の岡山県及び四国における分布」, *Naturalistae*, 11: 1-8
- 大友 令史, 斎藤 真理子, 岩舘 康哉 (2010). 「アカスジカスミカメによる斑点米被害発生要因の解析」, 北日本病害虫研究会報, 61: 125-128
- 大友 令史 (2013) 「東北地方におけるアカスジカスミカメの発生と防除」, 日本応用動物昆虫学会誌, 57(3), 137-149
- 大塚 彰 (2012) 「イネウンカ類の長距離移動の最近の動向」, 植物防疫, 66(2), 92-95
- B. Lobell, D. (2010) “Robust negative impacts of climate change on African agriculture”, *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1), 1-8
- Schlenker, W., and M.J. Roberts (2009). “Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US crop Yields under Climate Change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 15594-15598
- Shimono Hiroyuki, Hasegawa Toshihiro, Iwama Kazuto (2002). “Response of growth and grain yield in paddy rice to cool water at different growth stage”, *Field Crops Research*, 73: 67-79
- 田淵 研, 市田 忠夫, 大友 令史, 加進 丈二, 高城 拓未, 新山 徳光, 高橋 良知, 永峯 淳一, 草野 憲二, 榊原 充隆, (2015). 「東北地域における斑点米カメムシ類: 2003-2013 年の発生動向と被害実態」, 東北農業研究センター研究報告, 117: 63-115
- 竹内 博昭, 渡邊 朋也, 石崎 摩美, 奥 慎太郎, 安田 哲也, 橘 真一郎, 奥谷 恭代, 鈴木 芳人 (2005). 「イネ科牧草・雑草上におけるクモヘリカメムシとホソハリカメムシの発生動態」, 日本応用動物昆虫学会誌, 49(4): 237-243
- 若松 謙一, 佐々木 修, 上藺 一郎, 田中 明男 (2007) 「暖地水稻の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響」, 日本作物学会紀事, 76(1): 71-78
- Welch, J. R., Vincent, J. R., Auffhammer, M., Moya, P.F, Dobermann, A., Dawe, D. (2010) “Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(33), 14562-67

- Yamamura Kohji, Yokozawa Masayuki (2002) “Prediction of a geographical shift in the prevalence of rice stripe virus disease transmitted by the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Fallen) (Hemiptera: Delphacidae), under global warming”, *Applied Entomology and Zoology*, 37(1), 181-190
- 横沢 正幸, 飯泉 仁之直, 岡田 将誌 (2009) 「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」, *地球環境*, 14(2):199-206
- 吉村 具子, 川崎 聡明, 加藤 智弘, 土門 清 (2004) 「穂いもちの発生が「はえぬき」の収量・品質に与える影響について」, *北日本病虫害研究会報*, 55, 40-42
- Yukawa Junichi, Kiritani Keizi, Gyoutoku Naohisa, Uechi Nami, Yamaguchi Daisuke, Kamitani Satoshi (2007) “Distribution range shift of two allied species, *Nezara viridula* and *N. antennata* (Hemiptera: Pentatomidae), in Japan, possibly due to global warming”, *Applied entomology and zoology*, 42(2): 205-215
- Yukawa Junichi, Kiritani Keizi, Kawasawa Tetsuo, Higashiura Yoshimitsu, Sawamura Nobuo, Nakada Ken, Gyoutoku Naohisa, Tanaka Akira, Kamitani Satoshi, Matsuo Kazunori, Yamauchi Seiei, Takematsu Yoko (2009) “Northward range expansion by *Nezara viridula* (Hemiptera: Pentatomidae) in Shikoku and Chugoku Districts, Japan, possibly due to global warming”, *Applied entomology and zoology*, 44(3): 429-437

Appendix

Appendix 表 1 気温が水稻の収量に与える影響の推定結果

変数	(1) 収量		(2) 収量	
病害虫変数無し				
気温				
9-12(第一段階)	-0.183	(0.762)	-0.826	(0.784)
12-15(第一段階)	0.41	(0.511)	0.472	(0.53)
15-18(第一段階)	-0.485	(0.433)	-0.703	(0.448)
18-21(第一段階)	-0.474	(0.453)	-0.67	(0.471)
21-24(第一段階)	-0.549	(0.489)	-0.647	(0.51)
24-27(第一段階)	-0.871*	(0.516)	-0.945*	(0.538)
27-30(第一段階)	-0.908*	(0.536)	-1.120**	(0.557)
30-33(第一段階)	-5.016***	(1.425)	-5.400***	(1.484)
15-18(第二段階)	-6.087***	(1.584)	-6.018***	(1.648)
18-21(第二段階)	-1.598***	(0.573)	-1.518**	(0.595)
21-24(第二段階)	-0.084	(0.265)	-0.04	(0.276)
24-27(第二段階)				
27-30(第二段階)	0.203	(0.188)	0.2	(0.192)
30-33(第二段階)	-0.876	(0.777)	-1.018	(0.8)
9-12(第三段階)	-2.522*	(1.363)	-2.817**	(1.412)
12-15(第三段階)	-1.126*	(0.63)	-1.386**	(0.658)
15-18(第三段階)	0.176	(0.379)	0.033	(0.394)
18-21(第三段階)	0.145	(0.34)	0.049	(0.355)
21-24(第三段階)	0.191	(0.357)	-0.021	(0.371)
24-27(第三段階)	0.305	(0.372)	0.181	(0.387)
27-30(第三段階)	0.472	(0.42)	0.468	(0.438)
30-33(第三段階)	-1.662*	(0.872)	-1.526*	(0.911)
カメムシ被害率(<50%)	-22.505	(43.795)		
カメムシ被害率(>50%)	25.807	(17.782)		
ウンカ被害率(<50%)	-102.34	(79.815)		
ウンカ被害率(>50%)	-54.926***	(12.906)		
いもち病被害率(<50%)	-2.811	(18.278)		
いもち病被害率(>50%)	-24.943***	(8.887)		
逆ミルズ比				
観測数	460		460	
R2	0.494		0.436	
調整済みR2	0.361		0.299	
F値	6.962***		6.345***	

括弧内は頑健な標準誤差。*、**、***、はそれぞれ10%、5%、1%水準で有意。

いずれのモデルも年次及び地域に関する固定効果を含む。

Appendix 表 2 気温が水稻の品質に与える影響の推定結果

変数	(1) 1等級比率		(2) 1等級比率	
病害虫変数無し				
気温				
9-12(第一段階)	0.233	(0.58)	0.397	(0.571)
12-15(第一段階)	-0.479	(0.389)	-0.382	(0.386)
15-18(第一段階)	-0.526	(0.33)	-0.433	(0.326)
18-21(第一段階)	-0.687**	(0.346)	-0.618*	(0.343)
21-24(第一段階)	-0.946**	(0.373)	-0.892**	(0.371)
24-27(第一段階)	-0.763*	(0.393)	-0.724*	(0.392)
27-30(第一段階)	-0.920**	(0.408)	-0.880**	(0.405)
30-33(第一段階)	-1.366	(1.085)	-1.403	(1.079)
15-18(第二段階)	-0.487	(1.205)	-0.393	(1.198)
18-21(第二段階)	0.405	(0.436)	0.342	(0.433)
21-24(第二段階)	0.208	(0.202)	0.184	(0.201)
24-27(第二段階)				
27-30(第二段階)	-0.108	(0.143)	-0.096	(0.14)
30-33(第二段階)	-1.861***	(0.593)	-1.866***	(0.584)
9-12(第三段階)	-0.85	(1.037)	-0.806	(1.027)
12-15(第三段階)	0.496	(0.48)	0.489	(0.478)
15-18(第三段階)	0.164	(0.289)	0.161	(0.286)
18-21(第三段階)	-0.118	(0.259)	-0.141	(0.258)
21-24(第三段階)	-0.063	(0.273)	-0.072	(0.271)
24-27(第三段階)	-0.154	(0.284)	-0.142	(0.283)
27-30(第三段階)	-0.653**	(0.321)	-0.643**	(0.32)
30-33(第三段階)	-2.847***	(0.668)	-2.806***	(0.667)
カメムシ被害率(<50%)	-71.829**	(33.384)		
カメムシ被害率(>50%)	-24.639*	(13.699)		
ウンカ被害率(<50%)	32.233	(60.724)		
ウンカ被害率(>50%)	5.026	(9.829)		
いもち病被害率(<50%)	-12.875	(13.924)		
いもち病被害率(>50%)	-6.292	(6.761)		
逆ミルズ比	-41.897	(28.428)	-34.486	(27.886)
観測数	460		460	
R2	0.540		0.531	
調整済みR2	0.416		0.415	
F値	8.163***		9.068***	

括弧内は頑健な標準誤差。*、**、***、はそれぞれ10%、5%、1%水準で有意。

いずれのモデルも年次及び地域に関する固定効果を含む。